



HAL
open science

Caractérisation in situ et modélisation des contaminations des oeufs de perdrix grise en plaine de grande culture

Elisabeth BRO, James Devillers, Florian Millot, Hugo Devillers, Anouk Decors

► To cite this version:

Elisabeth BRO, James Devillers, Florian Millot, Hugo Devillers, Anouk Decors. Caractérisation in situ et modélisation des contaminations des oeufs de perdrix grise en plaine de grande culture. *Innovations Agronomiques*, 2017, 59, pp.1-11. 10.15454/1.5137845009257546e12 . hal-04482156

HAL Id: hal-04482156

<https://hal.inrae.fr/hal-04482156>

Submitted on 28 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Caractérisation *in situ* et modélisation des contaminations des œufs de perdrix grise en plaine de grande culture

Bro E.¹, Devillers J.², Millot F.¹, Devillers H.³, Decors A¹

¹ Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS), Direction de la Recherche et de l'Expertise, F-78610 Auffargis.

² Centre de Traitement de l'Information Scientifique (CTIS), 3 Chemin de la Gravière, F-69140 Rillieux La Pape.

³ Micalis Institut, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Domaine de Vilvert, F-78352 Jouy-en-Josas

Correspondance : elisabeth.bro@oncfs.gouv.fr

Résumé

Ce projet est une contribution à l'étude *in natura* des effets non intentionnels des produits phytopharmaceutiques sur la faune sauvage. Il s'est intéressé à la perdrix grise (*Perdix perdix*) en plaine de grande culture en tant que cas d'étude. Ses apports principaux concernent :

1. L'identification et la quantification de l'exposition potentielle des pontes à près de 200 substances actives (SA),
2. La mise en évidence de contaminations d'œufs par certaines SA (actuelles et anciennes),
3. L'estimation du potentiel de perturbation endocrinienne des SA, ainsi que diverses autres propriétés physico-chimiques et biologiques,
4. L'élaboration d'un modèle d'évaluation du risque des SA sur les perdrix.

Mots-clefs : Perdrix grise, Grande culture, QSAR/QSPR, Exposition potentielle, Analyse de résidus, Perturbation endocrinienne, Aromatase, Toxicité aiguë, Comportement dans l'environnement, Oeufs, Méthode SIRIS, SimToxPP.

Abstract : *In situ* characterisation and modelling of contaminations of grey partridge eggs in lowland fields

This project contributes to the *in situ* assessment of the unintended effects of phytopharmaceuticals on wildlife, taking the farmland grey partridge (*Perdix perdix*) as case study. The key results are:

1. The identification and quantification of the potential exposure of clutches to ca. 200 active substances (ASs),
2. The detection of contamination of eggs by several ASs (in use and banned),
3. The estimation of the endocrine disruption potential of ASs and the prediction of key physicochemical properties and toxicity,
4. The computation of a risk assessment model for the ASs, alone or in mixtures, against the partridges.

Key-words: Grey Partridge, Farmland, Phytopharmaceuticals, QSAR/QSPR, Potential exposure, Residue analysis, Endocrine disruption, Aromatase, Acute toxicity, Environmental fate, Eggs, SIRIS method, SimToxPP.

Introduction

Les milieux agricoles sont riches en biodiversité aviaire. Cette biodiversité a fortement régressé historiquement, et continue toujours à décliner aujourd'hui – contrairement à celle du milieu forestier (BirdLife International, 2015) – et ce malgré les actions mises en place de longue date par les politiques publiques comme les mesures agri-environnementales. Ce déclin persistant est attribué à une série de facteurs parmi lesquels l'évolution de l'habitat et les pratiques agricoles (BirdLife International, 2015). Plusieurs travaux récents suggèrent un impact négatif de l'usage des produits phytopharmaceutiques (PPP) sur les populations d'Oiseaux (*e.g.*, Hallmann *et al.*, 2014), mais il existe des controverses concernant les contributions respectives des différents facteurs (cf. Hill *et al.*, 2014). Ces débats autour des approches corrélatives sont d'autant plus ouverts que les effets non intentionnels (ENI) de l'usage de certains PPP actuellement utilisés en agriculture sur l'avifaune des écosystèmes cultivés restent insuffisamment identifiés, décrits, et quantifiés en nature, en particulier en ce qui concerne la reproduction (Mineau, 2005).

L'objectif de ce projet de recherche mené de 2012 à 2015 était de contribuer à l'étude des ENI des PPP sur la faune sauvage en nature. Plus précisément, il s'agissait (Figure 1) :

- De modéliser l'exposition des femelles et de leurs pontes aux substances actives (SA) ;
- De mettre en évidence, ou non, une contamination des œufs à des SA consécutivement à leur utilisation en agriculture ;
- De proposer un modèle d'évaluation des risques potentiels des SA vis-à-vis des perdrix, fondé notamment sur leurs activités toxicologiques et leurs propriétés physico-chimiques.

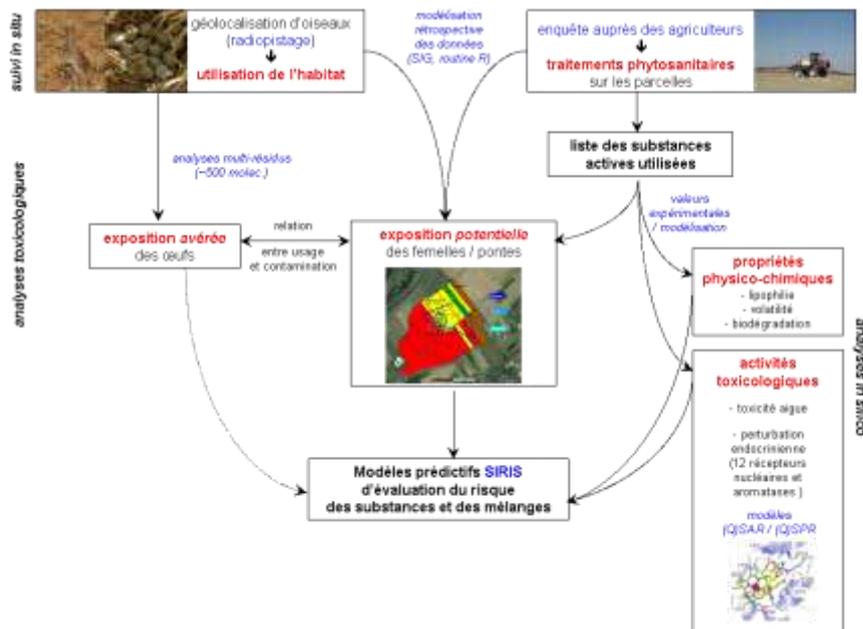


Figure 1 : Schéma récapitulatif de l'approche pluridisciplinaire mise en œuvre pour étudier les éventuels effets non intentionnels des produits phytopharmaceutiques sur la reproduction de la perdrix grise de plaine (voir texte pour le détail des différents volets).

Nous nous sommes intéressés spécifiquement au milieu cultivé (plaine de grande culture) et aux oiseaux, par le biais du modèle « perdrix grise » (*Perdix perdix*). Le choix de cette espèce comme modèle d'étude est justifié par sa biologie qui l'expose tout particulièrement aux PPP. Inféodée aux plaines céréalières, elle niche principalement dans les cultures (blé d'hiver) et consomme, selon son âge et les saisons, des fragments végétaux et des graines de plantes adventices et cultivées, ainsi que divers

invertébrés (Bro, 2016). Ces caractéristiques écologiques qu'elle partage avec d'autres espèces d'oiseaux spécialistes des milieux agricoles ou les fréquentant (bergeronnettes, fauvette grisette, tarier pâtre, linotte mélodieuse, bruants, alouette des champs, pigeon ramier, caille de blés, etc.) lui confère un potentiel de représentativité de l'avifaune. A ce titre la perdrix grise fait partie des espèces focales dans le dispositif de Biovigilance, et des espèces retenues dans l'indicateur « oiseau - milieux agricoles » du dispositif VigieNature du Museum National d'Histoire Naturelle.

1. Matériels et méthodes

1.1 La reproduction de la perdrix grise de plaine

Chez cette espèce, le succès de la reproduction est un facteur important de la bonne santé des populations. La productivité est potentiellement très forte : la taille de ponte est en moyenne de 14-15 œufs, mais elle peut dépasser 20 œufs ; lorsque la première ponte est détruite, la femelle peut en pondre une deuxième, voire une troisième (d'environ 12 et 8 œufs) (Bro *et al.*, 2013 ; Bro, 2016) . Cependant, dans son environnement de vie actuel, les pertes sont très élevées (Bro *et al.*, 2013 ; Bro, 2016). Près de 40 % des femelles meurent sur leur nid, seules 50 % des pontes éclosent, le taux de non-éclosion des œufs dans les pontes écloses est de 13 %, et la survie des poussins est faible – en moyenne 50 % d'entre eux disparaissent au cours des deux premières semaines de vie.

1.2 Suivi individuel de l'utilisation de l'habitat et de la reproduction des perdrix par radiopistage

Le radiopistage est une technique qui consiste à suivre à distance des animaux équipés d'un émetteur-radio. Cet appareil permet de savoir si l'animal qui le porte est vivant ou mort, où il se trouve, et de trouver son nid.

Nous avons suivi des perdrix **sauvages** (n = 467 femelles) sur 12 terrains du Bassin parisien correspondant à de la plaine cultivée en grande culture (environ 15 000 ha) dans le cadre de l'étude dite « PeGASE » en 2010-2011 (Bro *et al.*, 2013). Chaque perdrix a été géolocalisée deux fois par jour, et ses positions dans l'agroécosystème reportées sur un fond cartographique dans un SIG nomade (Trimble Juno SB, D3E Electronique). Pour chaque ponte détectée (n = 281), nous avons recueilli des informations concernant sa localisation et le couvert utilisé, le nombre d'œufs pondus, son devenir (éclosion vs. échec) et éventuellement sa cause d'échec (prédation, pratique agricole, abandon, etc.). Nous avons collecté¹ les œufs non éclos ainsi que les coquilles des œufs éclos et détruits. Ils ont été caractérisés selon une série de descripteurs : dimension, poids, couleur et épaisseur de la coquille, statut (œuf clair ou embryonné), stade de développement de l'embryon, malformation macroscopique éventuelle de l'embryon (Bro et Devillers, 2016).

Les œufs non éclos présentent un intérêt majeur pour l'étude des ENI des PPP, en particulier lorsqu'il s'agit de cas d'échecs individuels au sein de pontes réussies, étant donné que l'infertilité et la mortalité embryonnaire sont des effets potentiels d'ENI des SA sur la reproduction des oiseaux (*e.g.*, Bishop *et al.*, 2000 ; Kitulagodage *et al.*, 2011 ; Lopez-Antia *et al.*, 2015 ; Mineau, 2005). En outre, les œufs non éclos offrent du matériel biologique pertinent pour la recherche de résidus.

1.3 Enquête sur les pratiques phytosanitaires parcellaires auprès des agriculteurs

Une enquête a été réalisée auprès des 142 agriculteurs participant à l'étude PeGASE pour connaître les traitements réalisés sur leurs différentes parcelles cultivées. Parmi les informations demandées figuraient l'identification des parcelles et les détails des épandages (date d'application, nom commercial du PPP utilisé, dose, mélange en cuve). Des données ont ainsi été collectées pour environ 1 000 parcelles

¹ Autorisation de prélèvement, de transport, et de détention des œufs par l'ONCFS et ses partenaires : AP n°2010-013.

totalisant 6 500 ha. Les SA épandues ont été identifiées à partir des noms commerciaux en utilisant la base de données E-PHY du ministère de l'agriculture. Nous avons listé 179 SA différentes épandues entre le 1^{er} mars et le 31 août en 2010 et 2011 (Bro *et al.*, 2015).

1.4 Identification et quantification de l'exposition potentielle des pontes aux substances

L'exposition potentielle des perdrix et de leurs pontes aux SA a été identifiée et quantifiée *via* le croisement spatio-temporel des données journalières de localisation des perdrix dans les parcelles cultivées (radiopistage) et de traitements des cultures (pratiques phytosanitaires) à l'aide d'un système d'information géographique (QGIS, version 1.8.0. "Lisboa") (Bro *et al.*, 2015). Cette méthodologie se base sur la définition des espèces focales fournie par l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (*i.e.*, oiseaux présents dans une parcelle donnée au moment des traitements ; EFSA, 2009). Elle tient compte de l'ensemble des pratiques des agriculteurs, de l'utilisation de l'habitat par les perdrix, et la chronologie individuelle de la nidification des perdrix à des échelles fines (parcelle, jour). En outre, plusieurs stades biologiques d'exposition ont été distingués (couvaion, ponte, pré-ponte) selon les recommandations d'un groupe d'experts international (cf. Vol. 14, Ecotoxicology, 2005). En effet, l'embryon est plus ou moins sensible selon son stade de développement, la fenêtre d'exposition est donc un facteur de risque important. Des routines, écrites en langage R, ont été développées pour représenter graphiquement et d'une façon dynamique ces différentes informations (Bro et Devillers, 2016).

1.5 Analyse de résidus

Des analyses multi-résidus ont été réalisées sur 139 œufs de 52 pontes. Leur objectif était d'avérer, le cas échéant, une contamination réelle des œufs (Bro *et al.*, 2016a). Ce point est particulièrement crucial dans l'étude des ENI. En effet, c'est uniquement sur cette base que l'on peut envisager la notion d'ENI d'une ou plusieurs SA sur l'individu ou sa descendance.

Au vu à la fois des résultats d'exposition potentielle et du caractère exploratoire du travail (absence de références déjà établies), nous avons retenu l'option des analyses multi-résidus. Elles ont été réalisées par le laboratoire Phytocontrol, accrédité par la COFRAC pour la recherche et la quantification de pesticides dans les denrées alimentaires. Il propose un screening LC/MS-MS et un screening GC/MS-MS recherchant environ 250 composés chacun, avec une limite de quantification (LoQ) de 0,01 mg/kg pour la quasi majorité des molécules (valeur réglementaire pour les limites maximales de résidus), et une limite de détection de moitié. Le protocole d'analyse, de calibrage, et de contrôle est détaillé dans Bro *et al.* (2016a). Ces screenings ont permis de rechercher 85,5 % des SA de notre liste. Les résultats des analyses de résidus sont à interpréter dans le strict cadre des substances recherchées et de leur LoQ : *i.e.*, l'absence de détection n'est pas interprétable.

Le choix des pontes/œufs à analyser a été fait selon trois stratégies. La première, qui a concerné le tout premier lot d'échantillons, a consisté à sélectionner les œufs présentant des anomalies – malformation embryonnaire, coquille fine. La deuxième a ciblé les pontes écloses mais présentant un faible taux d'éclosion des œufs (< 80 %). La probabilité de révéler d'éventuels ENI des SA sur l'éclosion des œufs était en effet la plus élevée avec un échantillon de « pire cas ». La troisième stratégie a visé à analyser des œufs associés à des expositions multiples, impliquant en priorité des SA avec un rapport toxicité-exposition sur le long-terme (TER_i) inférieur à 5 (critère d'évaluation du risque pour la reproduction ; EFSA, 2009). D'autres considérations d'ordre analytique et financière se sont également superposées à ces choix (Bro *et al.*, 2016a).

1.6 Caractérisation des substances

Les différentes SA ont été caractérisées par leurs activités toxicologiques et leurs propriétés physico-chimiques. Cette caractérisation s'est faite principalement par l'emploi de modèles (Q)SAR ((Quantitative) Structure-Activity Relationship) et (Q)SPR ((Quantitative) Structure-Property Relationship).

Notre objectif était, soit d'utiliser des modèles ayant subi une validation externe rigoureuse et disponibles gratuitement, soit de les élaborer.

1.6.1 Activités toxicologiques

S'agissant de la reproduction des perdrix et de problèmes d'éclosion de leurs œufs suite à des expositions potentielles à des PPP, l'évaluation de leur caractère perturbateur endocrinien (PE) potentiel était primordiale. Ainsi, dans un premier temps, une étude bibliographique fouillée a été réalisée pour identifier les résultats *in vitro* et *in vivo* disponibles pour 197 molécules. En complément, un modèle récent, appelé « Endocrine Disruptome » et disponible gratuitement (<http://endocrinedisruptome.ki.si/>), a été validé puis utilisé. Il permet d'estimer une probabilité de binding (liaison) sur 12 récepteurs nucléaires² avec pour certains une distinction entre les effets agonistes et antagonistes (Devilleers *et al.*, 2016).

L'inventaire des SA ayant permis d'identifier de nombreux fongicides azolés, il nous est apparu intéressant de développer un modèle permettant de prédire leurs effets sur l'aromatase des oiseaux, puisque cette enzyme est leur cible privilégiée. L'aromatase intervient dans la différenciation sexuelle des oiseaux et joue un rôle fondamental dans le comportement des mâles (e.g., parade nuptiale, agressivité). Du fait des informations disponibles, nous avons opté pour une modélisation par homologie. La séquence de l'aromatase de perdrix n'existant pas, celles d'oiseaux proches taxonomiquement ont été utilisées. Elles concernaient la séquence de la poule (*Gallus gallus*), de la caille japonaise (*Coturnix coturnix japonica*) et du diamant mandarin (*Taeniopygia guttata*). Disposant de données expérimentales intéressantes sur la truite (*Oncorhynchus mykiss*), un modèle d'homologie pour l'aromatase de ce poisson a également été élaboré. L'aromatase, disponible sous forme cristallisée chez l'homme (PDB : 3EQM), a été utilisée comme template (gabarit). Les différentes séquences ont été alignées et des modèles d'homologies ont été élaborés pour chaque espèce. Les modèles ont été utilisés pour prédire l'inhibition potentielle de 46 molécules azolées et apparentées mais ils sont opérationnels pour toutes les molécules ayant des caractéristiques structurales similaires (Saxena *et al.*, 2015).

La toxicité aiguë (TA) des substances a été estimée à partir du modèle Web-ICE v3.2.1 (Web-based Interspecies Correlation Estimation) proposé par l'US EPA (<http://www3.epa.gov/ceampubl/fchain/webice/>) du fait du manque de données expérimentales chez la perdrix grise (Bro et Devillers, 2016). Ce modèle, disponible gratuitement, a été utilisé pour prédire les DL₅₀ (dose létale 50 %) chez la perdrix grise à partir de DL₅₀ expérimentales disponibles chez d'autres espèces d'oiseaux. Les équations sont du type $\log_{10} DL_{50} (\text{Perdrix}) = a \times \log_{10} DL_{50} (\text{Autre Espèce d'oiseau}) + b$. Les espèces les plus proches taxonomiquement de la perdrix étaient choisies en priorité.

1.6.2 Propriétés physico-chimiques

Les SA ont également été caractérisées par leurs principales propriétés physico-chimiques et en particulier :

- Le coefficient de partage 1-octanol/eau (log P) traduisant le caractère hydrophobe des molécules. Il permet de rendre compte de la faculté d'une molécule organique à s'accumuler dans les parties grasses des organismes ainsi que dans les sols. Les valeurs de log P ont été sélectionnées à partir de résultats expérimentaux et de ceux produits par cinq modèles QSPR fondés sur des méthodologies différentes.
- La pression de vapeur (PV, en Pascal) qui rend compte du degré de volatilisation d'une substance permet, d'une façon générale, d'estimer l'affinité d'une molécule pour le compartiment aérien. Elle permet

² Le récepteur aux androgènes (effets agonistes et antagonistes), les récepteurs aux estrogènes α et β (effets agonistes et antagonistes), le récepteur glucocorticoïde (effets agonistes et antagonistes), les récepteurs des oxystérols (liver X receptors, LXR α et LXR β), les récepteurs activés par les proliférateurs de peroxysomes (peroxisome proliferator-activated receptors, PPAR α , β/δ , γ), le récepteur X des rétinoïdes (RXR α , retinoid X receptor) et les récepteurs thyroïdiens α et β .

également de faire un lien avec la toxicité par inhalation. Les valeurs de PV ont été estimées à partir de la méthode modifiée de Grain.

- La biodégradation primaire représente la première étape de dégradation d'une molécule. Les métabolites issus de cette première étape peuvent continuer à se dégrader jusqu'à l'obtention de dioxyde de carbone, d'eau et de sels inorganiques, ce qui représente la biodégradation ultime. Ces deux propriétés, qui permettent de caractériser la persistance d'une molécule organique dans l'environnement, ont été estimées à partir des modèles de type structure-biodégradabilité BioWin 4 et BioWin 3, disponibles gratuitement (<http://www2.epa.gov/tsca-screening-tools>).

1.7 Calcul d'un score de risque des substances

La modélisation prédictive a été réalisée à l'aide de la méthode multicritère SIRIS (Système d'Intégration des Risques par Interaction de Scores) développée par Vaillant *et al.* (1995). Les valeurs des variables (critères) toxicologiques et physico-chimiques des 197 molécules ont été transformées en modalité « favorable », « moyennement favorable » ou « défavorable » selon des valeurs seuils justifiées. L'agrégation des critères hiérarchisés suivant un algorithme spécifique a permis de calculer des scores de risques pour les substances ayant potentiellement contaminé les perdrix et leurs pontes.

2. Résultats

2.1 Une exposition potentielle élevée des pontes aux substances

Nous avons estimé que 71 % pontes (n = 140) sont potentiellement exposées à au moins une SA (Bro *et al.*, 2015). L'exposition a principalement lieu en période d'ovogénèse et de ponte, c'est-à-dire à des stades précédant le développement embryonnaire, ce qui augmente la probabilité que ce dernier soit impacté. En outre, 67 % des pontes sont exposées à une combinaison de SA plus ou moins complexe. Selon les cas, ces expositions multiples résultent de l'utilisation de co-formulations commerciales, de mélanges extemporanés, et/ou de l'utilisation de l'espace par les perdrix. Les pontes sont exposées à une grande diversité de SA (plus d'une centaine), toutefois, sur le plan quantitatif, 32 d'entre elles apparaissent être « principales » (pourcentage de pontes exposées ≥ 5 %, Tableau 1). Ce sont essentiellement des fongicides (53 %), des herbicides (25 %) et dans une moindre mesure des insecticides (16 %).

2.2 Diverses contaminations détectées

Les analyses de résidus ont confirmé l'exposition de certains œufs à certaines SA (Tableau 1 ; Bro *et al.*, 2016a). Ce résultat, qui était « attendu », a été finement caractérisé. Au moins une SA a été détectée dans 24 des 52 pontes analysées (47 %). 15 SA ont été détectées, dont 9 actuellement utilisées en agriculture (Tableau 1). D'autres en revanche sont des substances aujourd'hui interdites, parfois de longue date.

D'un point de vue quantitatif, il reste délicat de conclure quant à l'importance de la contamination, tant en termes de prévalence du fait de la nature de l'échantillon analysé (œufs non éclos) que d'effets sur les œufs/embryons (pas d'analyses sur des témoins pour des raisons méthodologiques, et absence de données de référence) – (Bro *et al.*, 2016a ; Bro et Devillers, 2016).

Tableau 1 : Principales substances actives auxquelles les pontes de perdrix grise sont potentiellement exposées, résultats des analyses de résidus, et score de risque du modèle SimToxPP (ci-dessous). Les données détaillées pour l'ensemble des substances sont fournies dans Bro *et al.* (2015, 2016a) et Bro et Devillers (2016).

| Substance active | Statistiques d'usage agricole | | Exposition potentielle | Pontes analysées (52) | | | score de risque |
|----------------------------|---------------------------------|--|------------------------------|---|--|------------------|-----------------|
| | en % des 12 territoires d'étude | en % des 142 agriculteurs participants | en % des 140 pontes étudiées | Nb de pontes potentiellement exposées à la substance ** | Nb de pontes dans lesquelles la substance a été détectée | Concentration*** | |
| Prothioconazole | 91,7 | 72,5 | 34,3 | 18 | 0 | - | 42 |
| Epoxiconazole | 100,0 | 71,1 | 30,0 | 13 | 0 | - | 60 |
| Boscalid | 100,0 | 57,0 | 20,7 | 12 | 0 | - | 35 |
| Propiconazole | 83,3 | 43,7 | 19,3 | 10 | 0 | - | 41 |
| Chlorothalonil | 100,0 | 50,0 | 18,6 | 8 | 0 | - | 36 |
| lambda-Cyhalothrin | 91,7 | 52,8 | 18,6 | 9 | 1 | < 0,01 | 58 |
| Prochloraz | 91,7 | 61,3 | 18,6 | 11 | 4 | < 0,01 - 0,041 | 55 |
| Fluoxastrobin | 75,0 | 40,8 | 17,9 | 6 | 0 | - | 34 |
| Cyproconazole | 100,0 | 43,0 | 17,1 | 11 | 2 | 0,015 - 0,021 | 49 |
| Tebuconazole | 91,7 | 46,5 | 17,1 | 15 | 1 | < 0,01 | 37 |
| Chloromequat chloride | 100,0 | 61,3 | 13,6 | 6 | 0 | - | 27 |
| Ethephon | 75,0 | 35,9 | 12,1 | 4 | non recherché | - | 16 |
| Metconazole | 91,7 | 38,7 | 12,1 | 5 | 0 | - | 52 |
| Phenmedipham | 75,0 | 46,5 | 11,4 | 7 | 0 | - | 33 |
| Fenpropidine | 75,0 | 38,0 | 10,7 | 4 | 3 | 0,032 - 0,340 | 53 |
| Ethofumesate | 75,0 | 42,3 | 10,0 | 6 | 0 | - | 9 |
| Fluroxypyr | 100,0 | 44,4 | 10,0 | 5 | 0 | - | 16 |
| Metamitron | 75,0 | 45,1 | 10,0 | 7 | 0 | - | 20 |
| Azoxystrobin | 83,3 | 38,0 | 9,3 | 6 | 0 | - | 24 |
| Cyperméthrin | 100,0 | 18,3 | 9,3 | 6 | 0 | - | 69 |
| Lenacil | 75,0 | 43,7 | 9,3 | 5 | 0 | - | 24 |
| Clopyralid | 91,7 | 38,7 | 7,9 | 3 | non recherché | - | 21 |
| Trifloxystrobin | 75,0 | 21,8 | 7,9 | 4 | 0 | - | 35 |
| Deltaméthrin | 66,7 | 26,1 | 7,1 | 3 | 0 | - | 41 |
| MCPA | 75,0 | 33,1 | 7,1 | 3 | 0 | - | 17 |
| Pyraclostrobin | 75,0 | 19,7 | 7,1 | 4 | 0 | - | 26 |
| Spiroxamine | 50,0 | 17,6 | 7,1 | 3 | 0 | - | 33 |
| Mancozeb | 75,0 | 18,3 | 6,4 | 3 | non recherché | - | 37 |
| Picoxystrobin | 66,7 | 17,6 | 6,4 | 2 | 0 | - | 21 |
| Desmedipham | 75,0 | 17,6 | 5,0 | 3 | 0 | - | 29 |
| Pirimicarb | 83,3 | 23,2 | 5,0 | 2 | 0 | - | 52 |
| Thiacloprid | 66,7 | 18,3 | 5,0 | 1 | 0 | - | 48 |
| Bromoxynil | 83,3 | 24,6 | 3,6 | 3 | 1 | < 0,01 | 42 |
| Difenoconazole | 66,7 | 23,9 | 0,7 | 0 | 1 | 0,013 | 42 |
| Diflufenican | 66,7 | 23,2 | 0,7 | 1 | 1 | 0,016 | 39 |
| Thiamethoxam/Clothianidine | 41,7 | 7,0 | 0,0 | 0/- | 3 | 0,013 - 0,067 | 16/- |
| DDT (Σisomères)* | - | - | - | - | 6 | < 0,01 - 0,046 | - |
| Diphenylamine* | - | - | - | - | 3 | < 0,01 - 0,019 | - |
| Fipronil (+sulfone)* | - | - | - | - | 3 | 0,0068 - 0,0085 | - |
| HCH (α,β,δ)* | - | - | - | - | 1 | 0,015 | - |
| Heptachlore (+epoxyde)* | - | - | - | - | 3 | < 0,01 - 0,11 | - |

* usage interdit en France lors de l'étude

** selon la méthode décrite dans Bro *et al.* 2015 qui a considéré l'exposition jusqu'à 15 jours avant la ponte du 1er œuf

*** "< 0,01" signifie que la substance a été détectée mais n'a pas pu être quantifiée

**** analyse spécifique

2.2 Un effet potentiel adverse des azoles sur l'aromatase des oiseaux

Une forte similarité a été trouvée entre l'aromatase humaine et celles de *G. gallus* (82,0 %), *C. japonica* (81,2 %), *T. guttata* (81,9 %), et d'*O. mykiss* (81,9 %). Des corrélations significatives ont été obtenues entre les données d'activités mesurées des molécules et les valeurs correspondantes de docking (amarrage) sur les différents modèles (Saxena *et al.*, 2015). Lorsque l'on représente par un code couleur les scores de docking obtenus pour les 46 molécules azolées et apparentées sur les aromatasés étudiées (Figure 2) on constate que la plupart des molécules se comportent de la même façon quel que soit le type d'aromatase.

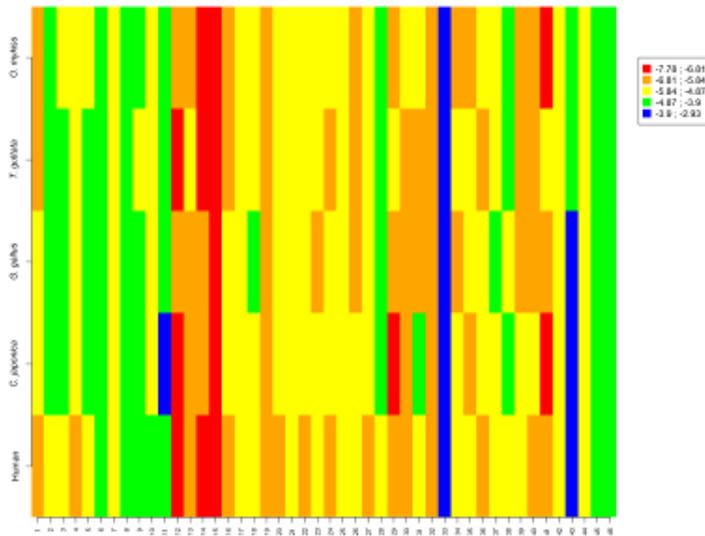


Figure 2 : Scores de docking des 46 molécules étudiées (représentées en abscisses) obtenus sur les aromatasés humaine, de *C. japonica*, *G. gallus*, *T. guttata* et *O. mykiss* (en ordonnées).

2.3 Caractéristiques des substances et score de risque

Avec la méthode SIRIS, la hiérarchisation des critères consiste uniquement à les positionner les uns par rapport aux autres sans qu'il soit nécessaire d'introduire des pondérations comme dans certaines méthodes multicritères. Les différents critères sont classés par ordre décroissant d'importance.

S'agissant *in fine* d'estimer des risques d'accidents de pontes potentiellement dus aux effets adverses des molécules contaminant les parcelles, les effets perturbateurs endocriniens (PE) potentiels et la toxicité aiguë (TA) apparaissent prépondérants, le premier critère étant plus important que le second. Le coefficient de partage 1-octanol/eau (log P) renseigne à la fois sur le pouvoir de bioconcentration d'une molécule et sur son comportement dans l'environnement. C'est la raison pour laquelle nous l'avons placé en troisième position. Nous avons montré qu'il était plus pertinent de placer le critère BioWin3 avant BioWin4 que l'inverse (Devillers *et al.*, 2013). C'est cet ordre que nous avons conservé. Enfin, pour le critère pression de vapeur (PV), nous avons testé son influence avant et après log P ainsi qu'à la fin de la hiérarchie. C'est cette dernière position qui a donné les résultats les plus logiques. C'est la raison pour laquelle, nous avons adopté la hiérarchie suivante : PE > TA > log P > BioWin3 > BioWin4 > PV.

Un programme écrit en R (version 3.1.1), appelé SimToxPP (Simulation of Toxicity in *Perdix perdix*) a été réalisé pour identifier pour chaque poule, son parcours, sa période critique de ponte, et sélectionner les molécules potentiellement rencontrées à considérer dans les calculs et celles à représenter pour une éventuelle interprétation supplémentaire. Ainsi, la date de la fin de ponte est représentée sur la sortie graphique de SimToxPP par un rond vert, orange, ou gris au-dessus d'une flèche pleine selon que la ponte a éclos totalement, partiellement, ou qu'elle a totalement échoué. La cause de l'échec est directement reportée sur la figure lorsqu'elle est disponible. Le début de la période critique est représenté par une flèche en pointillés. Un score de risque est calculé pour chaque substance, ainsi que pour le mélange des substances indiquées en rouge. Le risque est d'autant plus élevé que le score est élevé (échelle relative permettant de hiérarchiser les risques des substances et de leurs mélanges). Le cas de la perdrix 587 est donné comme exemple illustratif d'une sortie typique de SimToxPP (Figure 3).

Le modèle SimToxPP, dont le code R est fourni dans Bro et Devillers (2016), permet de calculer pour n'importe quel type de SA, seules ou en mélange, un score de risque sur une échelle relative (Tableau 1 ; Bro et Devillers, 2016). Ce score est un critère inédit et complémentaire de ceux déjà utilisés pour préconiser les meilleures pratiques phytosanitaires au regard des possibles ENI des SA sur la faune non cible.

Poule 587, subadulte (2011)

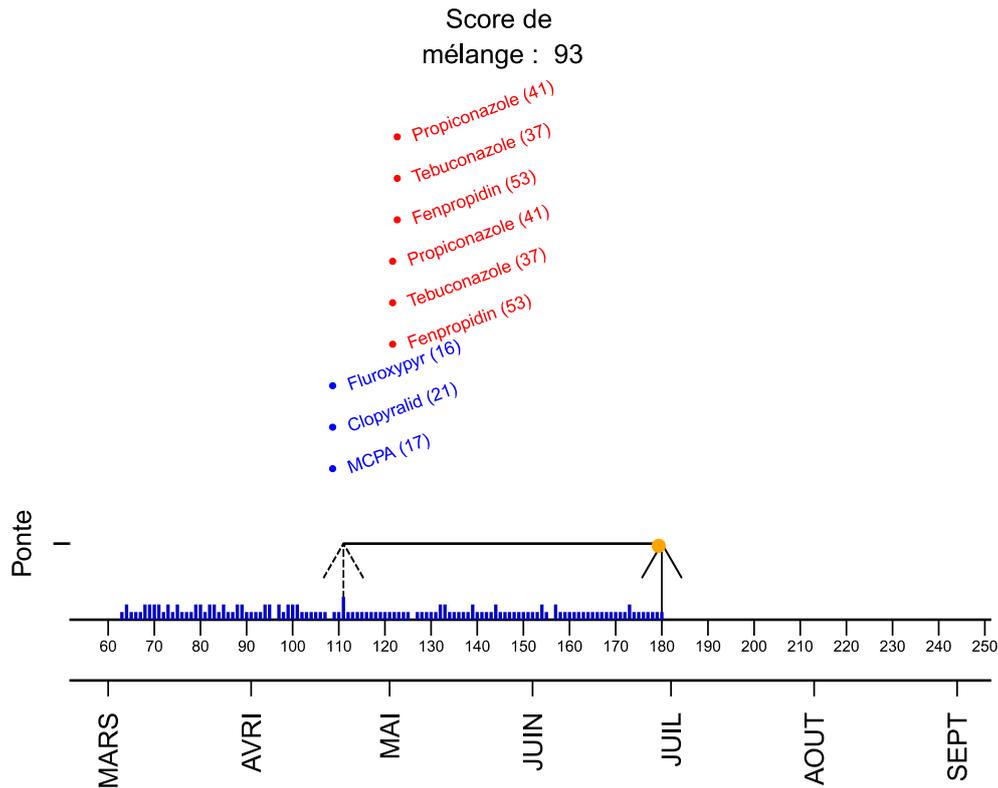


Figure 3 : Molécules épanchées dans les parcelles fréquentées par la perdrix baguée 587 en Grande Beauce, précédant (en bleu) ou pendant (en rouge) la période de formation et de ponte de ses œufs. Nid de 20 œufs installé dans une orge de printemps, éclos le 29 juin (14 œufs éclos soit 70 %, ce qui est plutôt faible – 4 embryons morts entre 3 et 19 jours, et 2 cas indéterminés).

3. Apport pour Ecophyto

Ce programme de recherche a apporté plusieurs contributions concrètes au plan Ecophyto :

- Des méthodologies et des outils transparents, accessibles, et facilement transposables à d'autres cas d'étude.
- De nombreuses bases de données détaillées, librement mises à disposition (cf. annexes dans Bro *et al.*, 2015, 2016 ; Devillers *et al.*, 2015 ; Saxena *et al.*, 2015 ; Bro et Devillers, 2016).
- Ces données peuvent être intégrées dans différentes actions de *Bonnes pratiques* (axe I), être mobilisées pour orienter la recherche (axe I, point 3) agronomique (pratiques innovantes) ou d'écotoxicologie (relation de cause-à-effet en laboratoire), ou encore être utilisées en tant que données complémentaires pour les dossiers des pétitionnaires lors des procédures d'évaluation des substances (axe III, point 15).
- Un retour d'expérience inédit de l'étude des ENI des PPP sur la reproduction des oiseaux *in natura*, offrant un cadre de réflexion pour le dispositif de phytopharmacovigilance.
- Le modèle SimToxPP permet d'estimer les risques des substances seules ou en mélange sur la perdrix. Facilement utilisable, il permet également de comparer les substances entre elles. Il est facilement modifiable pour répondre à une autre problématique sur la perdrix ou d'autres espèces d'oiseaux.

- Ces scores de risque pourraient être inclus dans des outils comme EPHY, AGRITOX ou DIAPHYT pour promouvoir les meilleures pratiques phytosanitaires au regard de la faune sauvage.

Les résultats de ce travail ont été très largement diffusés auprès d'une diversité d'acteurs (communauté scientifique, mondes agricole et cynégétique, écoles d'agriculture, industriels, évaluateurs des risques, gestionnaires des risques) via des publications scientifiques (4), des articles de vulgarisation (2), un document de synthèse (1) et une participation à une dizaine de colloques internationaux et nationaux.

Remerciements

Les données de terrain proviennent de l'étude « PeGASE » menée par l'ONCFS et une quinzaine de Fédérations de Chasseurs, en partenariat avec des agriculteurs et des chasseurs, avec un soutien financier émanant principalement de la Fédération Nationale des Chasseurs, de la Fondation François Sommer, de l'Europe, de l'Etat et de collectivités territoriales. A. Mesbah (ONCFS – Université de Tours – Fertil'avi), J.P. Brillard (Fertil'avi) et C. Bressac (Université de Tours) ont contribué aux analyses embryologiques. Les analyses de résidus et le travail de modélisation proviennent du projet « M6P », action financée dans le cadre de l'APR 2011 du programme de recherche « Evaluation et réduction des risques liés aux pesticides ». Ce programme est piloté par le ministère chargé de l'écologie, avec l'appui financier de l'ONEMA, par les crédits issus de la redevance pour pollutions diffuses attribués au financement du plan Ecophyto I piloté par le ministère chargé de l'agriculture. Ce travail a bénéficié de la participation de A.K. Saxena du Central Drug Research Institute (Lucknow, Inde) et de S.S. Bhunia du Global Institute of Pharmaceutical Education and Research (Kashipur, Inde).

Références bibliographiques

- Bro E., 2016. La Perdrix grise – Biologie, écologie, gestion et conservation. Biotope, Mèze, 304 p.
- Bro E., Devillers J., 2016a. Modélisation rétrospective et prospective des accidents de ponte chez la perdrix grise (*Perdix perdix*) en plaine de grande culture en relation avec l'usage agricole de produits phytopharmaceutiques. Rapport scientifique du programme M6P, 64 pages plus annexes.
- Bro E., Devillers J., 2016b. Phytos : effets non intentionnels sur la faune sauvage non cible : produits phytopharmaceutiques et reproduction de la perdrix grise en plaine de grande culture : résultats d'un programme de recherche 2012-2015 (« M6P »). ONCFS ed, 12-pages.
- Bro E., Devillers J., Millot F., Decors A., 2016a. Residues of plant protection products in grey partridge eggs in French cereal ecosystems. Environmental Science and Pollution Research 23, 9559-9573. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-016-6093-7> (open access)
- Bro E., Devillers J., Millot F., Decors A., 2016b. Utilisation des produits phytopharmaceutiques et reproduction des oiseaux en plaine de grande culture. Apports d'un projet de Recherche sur la perdrix grise. Faune Sauvage 310, 4-9.
- Bro E., Devillers J., Millot F., Devillers H., Decors A., 2016c. Détection de produits phytos dans les œufs de perdrix grise. Phytoma 697, 41-44.
- Bro E., Millot F., Decors A., Devillers J., 2015. Quantification of potential exposure of grey partridge (*Perdix perdix*) to pesticide active substances in farmlands. Science of Total Environment 521-522, 315-325. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.073> (open access)
- Devillers J., Bro E., Millot F., 2015. Prediction of the endocrine disruption profile of pesticides. SAR and QSAR in Environmental Research 26, 831-852. <http://dx.doi.org/10.1080/1062936X.2015.1104809>
- Devillers J., Lagadic L., Yamada O., Darriet F., Delorme R., Deparis X., Jaeg J.P., Lagneau C., Lapied B., Quiniou F., Yébakima A., 2013. Use of multicriteria analysis for selecting candidate insecticides for vector control. In, Juvenile Hormones and Juvenoids. Modeling Biological Effects and Environmental Fate (Devillers J., Ed.), CRC Press, Boca Raton, pp. 333-366.

Saxena A.K., Devillers J., Bhunia S.S., Bro E., 2015. Modelling inhibition of avian aromatase by azole pesticides. SAR and QSAR in Environmental Research 26, 757-782. <http://dx.doi.org/10.1080/1062936X.2015.1090749> (open access)

Vaillant M., Jouany J.M., Devillers J., 1995. A multicriteria estimation of the environmental risk of chemicals with the SIRIS method. Toxicology Modeling 1, 57-72.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL)